



Neue rein optische Systeme und Methoden zur präzisen Messung von magnetischen und elektromagnetischen Feldern

New All-optical Systems and Methods for Precise Magnetic and Electromagnetic Field Measurements

Magnetometer werden zur Untersuchung natürlicher oder künstlich erzeugter Magnetfelder verwendet. Typische Kraftflußdichten (in der Einheit „Tesla“, T) sind: Felder von supraleitenden Spulen: ca. 30 T, von starken Dauer- und Elektromagneten 1 T, Erdmagnetfeld ca. 0,03 mT, Magnetfeld der Ströme im menschlichen Herzen ca. 1/50000 des Erdmagnetfeldes, also unter 1 nT.

Zur Messung des Betrages und der Richtung eines magnetischen Feldes können viele bekannte Effekte der Physik (meist der Elektrizitätslehre) ausgenutzt werden: Induktion von Strömen in Spulen, der Hall-Effekt, Sättigung von Flußdichten (Fluxgate-Magnetometer), Quanteneffekte in Supraleitern (SQUID-Magnetometer, squid = superconducting quantum interference device) u.a.

Der Einfluss eines magnetischen Feldes auf die Spektrallinien eines Atoms ist seit 1896 unter dem Namen „Zeeman-Effekt“ bekannt. Das Feld bewirkt eine Aufspaltung in mehrere eng benachbarte Frequenzkomponenten. Um diese analysieren zu können, müssen hochauflösende Methoden der optischen Spektroskopie eingesetzt werden. Als Messmethode für (starke) Magnetfelder wird der Zeeman-Effekt vor allem in der Astronomie eingesetzt, da Informationen über Sternplasmen nur dem auf die Erde gelangenden Licht entnommen werden können.

Die Möglichkeit, mit Hilfe des Zeeman-Effekts der optischen Spektrallinien sehr kleine Magnetfelder messen zu können, wird durch den Umstand begrenzt, dass angeregte atomare Zustände nur eine begrenzte Lebensdauer (in der Größenordnung 10^{-7} Sekunden) besitzen. Dieser Umstand führt dazu, dass die so genannte „natürliche Linienbreite“ einer Spektrallinie (z.B. Wellenlänge 600 nm, d.h. Frequenz $\nu=5 \cdot 10^{14}$ Hertz) in der Größenordnung von 10 MHz liegt (das ist die Bandbreite, mit der ein ruhendes Atom abstrahlt). Somit müßte eine messbare Frequenzverschiebung der Spektrallinie durch das Magnetfeld in derselben Größenordnung liegen, was einer Feldstärke von ca. 0,1 mT entspricht. Dazu kommt noch der Umstand, dass erst „ruhende“ Atome präpariert werden müßten, da Atome in einer Zelle oder Lampe aufgrund ihrer thermischen Bewegung ein durch den Doppler-Effekt verbreitertes Linienprofil zeigen, dessen Halbwertsbreite etwa 100 mal größer ist als die natürliche Linienbreite.

Weitaus günstiger liegen die Verhältnisse, wenn man Übergänge zwischen den Hyperfeinstrukturkomponenten des atomaren Grundzustandes wählt. Die Lebensdauer derartiger Zustände ist außerordentlich hoch, weshalb die Übergänge natürliche Linienbreiten weit unterhalb von 1 Hz aufweisen. Die Übergangsfrequenz ist wesentlich kleiner als optische Frequenzen und liegt z.B. bei den Alkali-Atomen Na, Rb und Cs zwischen 1,8 und 9,1 GHz. Derartige Frequenzen können im Rahmen der elektrischen Hochfrequenztechnik sehr genau erzeugt werden. Zudem

reduziert sich auch die Doppler-Breite, sodass auch mit bewegten Atomen kleine Halbwertsbreiten beobachtbar sind.

Unterliegen die Atome der Wirkung eines magnetischen Feldes der Kraftflußdichte B, spalten die Hyperfeinniveaus, die durch eine Quantenzahl F gekennzeichnet sind, in jeweils $2F+1$ magnetische Subniveaus mit den Quantenzahlen m_F auf. Die Frequenzverschiebung eines Niveaus ist (im Fall, dass die Frequenzänderung durch das Feld klein gegenüber dem Frequenzabstand benachbarter Niveaus mit $\Delta F=1$ ist) proportional zu m_F mal B. Niveaus mit $m_F=0$ verschieben sich im Feld daher nicht. Somit weisen Übergänge zwischen derartigen Niveaus („Uhrenübergänge“) immer dieselbe

Frequenz auf, unabhängig von etwaigen Störfeldern (Abb.1). Derartige Übergänge werden daher in Atomuhren (meist betrieben mit Cäsium) genutzt, um genaueste Zeitmessungen vorzunehmen. Seit 1967 ist sogar die Sekunde mit Hilfe des Übergangs $F=3, m_F=0$ nach $F=4, m_F=0$ im Isotop Cs^{133} definiert als das 9.192.631.770-fache der Periodendauer dieses Übergangs.

Bei Rubidium-Atomuhren, die meist als Substandards eingesetzt werden (z.B. in Satelliten), verwendet man das Prinzip des optischen Pumpens, um eine Ungleichgewichtsbesetzung der am Übergang beteiligten Hyperfeinstruktur-niveaus zu erzeugen: Licht

geeigneter Frequenz (erzeugt mit Hilfe einer Rb-Spektrallampe und entsprechender Filterung) bewirkt in einer Absorptionszelle einen optischen Übergang von einem der beteiligten Hyperfein-Niveaus zu einem angeregten Niveau des Atoms. Dieses zerfällt mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit in beide Hyperfein-Grundniveaus. Daher findet man nach kurzer Anregungszeit praktisch die gesamte Popu-

lation im nicht gepumpten Hyperfein-Grundniveau (Herstellung der Ungleichgewichtsbesetzung), und das Pumplicht wird nur zu einem geringen Teil absorbiert (Abb. 2a). Strahlt man nun auf die Zelle eine Mikrowellenfrequenz (bei Rb^{87} ca. 6 GHz) ein, die Übergänge zwischen den Hyperfeinniveaus anregt, wird dadurch Gleichgewichtsbesetzung erzeugt (Abb. 2b) und das eingestrahelte Pumplicht wird stärker absorbiert als ohne Mikrowelleneinstrahlung (Abb. 2c). Somit läßt sich durch Detektion der transmittierten Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Frequenz des Mikrowellenfeldes ein Regelsignal für diese Frequenz gewinnen.

Das Prinzip der optisch gepumpten Atomuhr läßt sich auch für Magnetfeldmessungen nutzen: nun müssen nicht Übergänge zwischen Niveaus mit $m_F=0$, sondern Übergänge zwischen Niveaus mit $m_F \geq 1$ benutzt werden, da ihre Lage relativ zu den $m_F=0$ -Zuständen vom Magnetfeld abhängig ist (Abb.1). Um entsprechenden Frequenzabstand vom Uhrenübergang zu bekommen, wird dem zu messenden Feld meist ein konstantes bekanntes

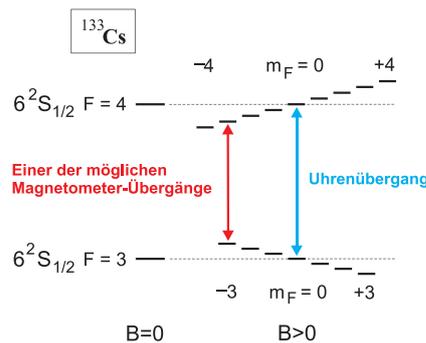


Abb.1. Aufspaltung von Hyperfeinstruktur-Niveaus im Magnetfeld

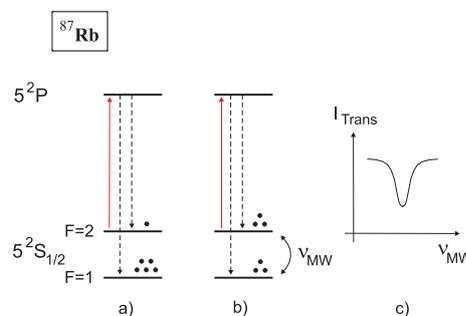


Abb.2. Prinzip des optischen Pumpens. a) Herstellen einer Ungleichgewichtsbesetzung. b) Die Mikrowellenfrequenz stellt wieder Gleichbesetzung her. c) Transmittierte Intensität I_{Trans} als Funktion der Mikrowellenfrequenz ν_{MW}

Magnetfeld überlagert. In jüngster Zeit ist es gelungen [1], mit derartigen Magnetometern bereits Empfindlichkeiten und Zeitaufösungen zu erreichen, die zur Detektion des Magnetfeldes des Herzens ausreichen. Der Vorteil gegenüber SQUID-Magnetometern liegt in der nicht notwendigen kryostatischen Ausrüstung, da keine tiefen Temperaturen (zum Erreichen eines supraleitenden Zustands) nötig sind.

Nachteil der optisch gepumpten Atomuhren und Magnetometer ist jedoch, dass um die Absorptionszelle ein Mikrowellen-Resonator vorhanden sein muss, da eine genügend hohe Mikrowellen-Intensität zur Herstellung des Ungleichgewichts erforderlich ist.

Mit Hilfe eines quantenmechanischen Effektes lässt sich das Problem der Einstrahlung eines Mikrowellenfeldes jedoch umgehen: Strahlt man zwei optische Frequenzen auf ein Atom ein, die gleichzeitig beide Hyperfein-Grundniveaus zu einem gemeinsamen oberen Niveau anregen, erwartet man zunächst erhöhte Absorption, da nun keine Atome durch optisches Pumpen aus dem Anregungszyklus fallen können. Dies ist auch richtig; wenn jedoch die Differenz der optischen Anregungsfrequenzen exakt der Hyperfein-Aufspaltung des Grundniveaus entspricht ($\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$, vgl. Abb.3), kann das Zwei-Frequenz-Licht nicht mehr absorbiert werden. Man erhält einen charakteristischen Einbruch der Fluoreszenzintensität, eine „Dunkelresonanz“. Durch die Wechselwirkung mit dem Zwei-Frequenz-Lichtfeld gelangt das Atom in einen kohärenten Überlagerungszustand aus beiden Grundniveaus, der nicht mit dem Lichtfeld wechselwirkt. In der Folge kann das Licht nicht mehr von den Atomen absorbiert werden, weshalb man bei Beobachtung des transmittierten Lichts von „elektromagnetisch induzierter Transparenz“ (EIT) spricht. Ein wesentlicher Vorteil der Methode ist, dass der Doppler-Effekt keine Rolle spielt, da die gemeinsame Verstimmung $\Delta\nu$ relativ zum angeregten Niveau das EIT-Signal nicht beeinflusst. Somit

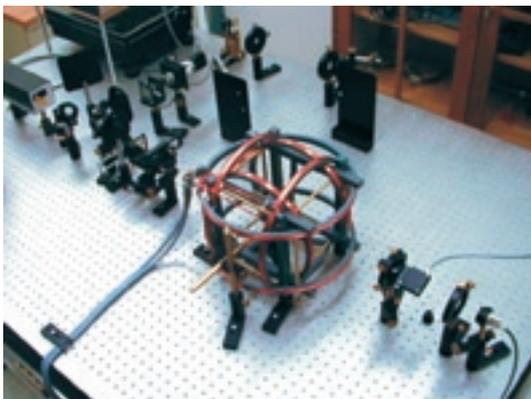


Abb.5. Aufbau zur Untersuchung der Absorption für ein System nach Abb.3a.

können auch in einer Zelle schmalbandige EIT-Signale erzeugt werden. Die erreichbare Linienbreite und der Kontrast der EIT-Signale wird durch verschiedene Relaxationsmechanismen bestimmt. Unsere

Arbeitsgruppe beschäftigt sich seit 1990 mit diesen Quanteneffekten; Übersichten über die geleisteten Arbeiten finden sich in [2].

Gehören die magnetischen Subniveaus zu einem Hyperfeinzustand, so kann sogar mit einer einzigen Lichtfrequenz gearbeitet werden (Abb.3a), die durch eine Zelle mit absorbierenden Atomen transmittiert wird. Die Bedingung zum Erreichen des Dunkelzustands ist eine Frequenzdifferenz gleich Null zwischen den beteiligten Subniveaus ($\nu_1 = \nu_2 = \nu_0$; $\nu_1 - \nu_2 = 0$); diese Bedingung wird beim Nulldurchgang des magnetischen Feldes erreicht. Scannt man also ein äußeres Feld, so beobachtet man ein Absorptionssignal mit einem EIT-Peak (Abb.4). Die erreichbare Signalbreite bei vollständiger Abwesenheit von Magnetfeldern beträgt wenige Hertz, das entspricht Magnetfeldern im Nanotesla-Bereich. Aus der Verbreiterung des EIT-Signals kann auf das Vorhandensein von äußeren, nicht kompensierbaren Magnetfeldern und ihre Stärke geschlossen werden. Eine entsprechende Versuchsanordnung zeigt Abb.5.

Um Dunkelresonanzen zwischen Subniveaus verschiedener Hyperfeinzustände nutzen zu können, muss zunächst kohärentes Zwei-Frequenz-Licht erzeugt werden. Dies kann z.B. durch die Erzeugung von Seitenbändern mit einem elektro- oder akustooptischen Modulator geschehen. Die Seitenbänder haben dann einen Frequenzabstand, der der Hyperfeinaufspaltung entspricht. Werden als absorbierende Atome Rb oder Cs verwendet, kann das benötigte Licht mittels Diodenlasern erzeugt werden. Die benötigten Seitenbänder können in Sonderfällen durch direkte Strommodulation erzeugt werden, was aber wegen der hohen Modulationsfrequenzen von 6 bzw. 9 GHz problematisch ist. Eine andere Möglichkeit ist das phasenstarre Koppeln des Lichts zweier Diodenlaser. Die Differenzfrequenz der beiden Lichtwellen wird gescannt, und das durch die Absorptionszelle transmittierte Signal aufgezeichnet. Jedesmal, wenn die Frequenzdifferenz mit dem Abstand zweier Zeeman-Subniveaus übereinstimmt ($\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$), ergibt sich ein EIT-Peak. Die bisher besten Resultate mit dieser Methode wurden von R. Wynands [3] publiziert; es ergibt sich eine Empfindlichkeit von etwa 1 Picotesla bei einer Mittelungszeit von einer Sekunde.

Gegenüber elektrischen Methoden zur Messung von Magnetfeldern ergibt sich der Vorteil, dass hier Magnetfeldsensoren völlig ohne Metallteile aufgebaut werden können: Der Absorptionszelle werden die Lichtfelder über eine Lichtleitfaser zugeführt, und das transmittierte Licht wird über dieselbe oder eine andere Faser zum Detektor rückgeführt. Bei entsprechender optischer Dichte des absorbierenden Dampfes werden Zellenlängen von nur wenigen Millimetern benötigt, sodass eine hohe räumliche Auflösung zu erwarten ist. Eine mögliche Anordnung zeigt Abb.6.

Die Arbeiten zur Entwicklung rein optischer Magnetfeld-Messme-

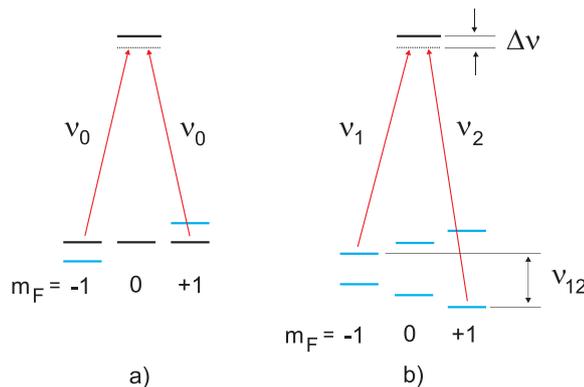


Abb.3. Bedingung für EIT für verschiedene Systeme. a) Subniveaus eines Hyperfeinzustandes. b) Subniveaus verschiedener Hyperfeinzustände

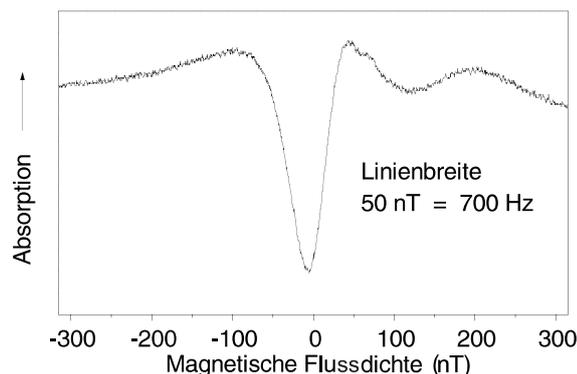


Abb.4. Absorption als Funktion der gescannten Flussdichte für ein System nach Abb.3a. Die Linienbreite von 700 Hz wird durch nicht kompensierte äußere Felder verursacht

thoden werden im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Projekts (G6RD-CT-2001-00642) durchgeführt. Am Projekt beteiligt sind eine Arbeitsgruppe an der Universität Siena (Prof. Moi, Projektkoordinator), eine Gruppe am Institut für Elektronik der bulgarischen Akademie der Wissenschaften in Sofia (Dr. Cartaleva), und

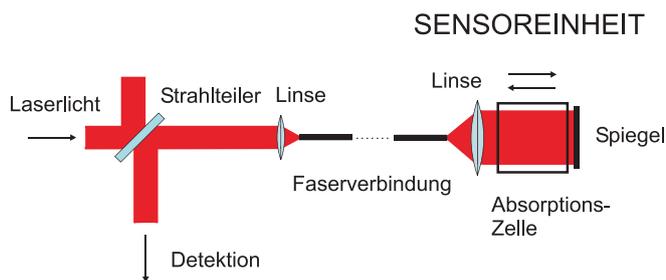


Abb.6. Möglicher Aufbau eines rein optischen Feldsensors

unsere Gruppe in Graz. Zwei bulgarische Firmen sollen später den Bau und Vertrieb der zu entwickelnden Geräte übernehmen. Ziel des Projektes ist es, für den praktischen Einsatz geeignete Methoden zu entwickeln und Prototypen von Magnetfeldmessgeräten aufzubauen. Als Projektlaufzeit sind 3 Jahre vorgesehen; im Jänner 2002 wurde mit den Arbeiten begonnen.

- [1] A.Weis; Department of Physics, University of Fribourg, Switzerland; private communication
 [2] L.Windholz; Physica Scripta T95, 81, 2001
 [3] M. Stähler, S. Knappe, C. Affolderbach, W. Kemp, R. Wynands; Europhys. Lett. 53, 323 (2001).

New All-optical Systems and Methods for Precise Magnetic and Electromagnetic Field Measurements

Magnetometers are widely used to measure the strength and direction of magnetic fields of natural or artificial sources. A large number of physical effects can be used for this purpose.

The influence of a magnetic field on atomic spectral lines is known as Zeeman-effect since 1896 and causes splitting of the original light frequency into several closely neighbouring components. Using the Zeeman effect for the measurement of small magnetic fields is limited by the width of the spectral lines.

The situation changes when considering transitions between hyperfine levels of the atomic ground state, showing natural line widths below 1 Hz. For alkali atoms like Na, Rb and Cs the transition frequencies have values between 1.8 and 9.1 GHz.

Under the influence of an external field with strength B , the hyperfine levels (characterized by their quantum number F) are splitted into $2F+1$ magnetic sublevels with quantum numbers m_F . For small fields the frequency shift of the sublevels is proportional m_F times B . Levels with $m_F=0$ are not influenced by B and are not shifting. Transitions between $m_F=0$ - levels are not shifting and can be used as „clock transitions“ in atomic clocks (Fig.1). Since 1967 the second is defined as 9,192,631,770 times the period of the transition $F=3, m_F=0$ to $F=4, m_F=0$ in the isotope Cs^{133} .

In case of Rb atomic clocks, used as time standards (e.g. in satellites), optical pumping in a cell filled with Rb vapor is used to establish an imbalance between the populations of the hyperfine levels (Fig.2a). A microwave field tries to reestablish equilibrium population (Fig.2b), and the intensity of the light transmitted through the cell is dependent on the microwave frequency (Fig.2c).

The principle of the optically pumped atomic clock can be used

also for measurements of magnetic fields: now transitions between sublevels with $m_F > 0$ have to be selected. With such devices, sensitivities large enough to detect the field of the human heart can be reached [1].

Using a quantum interference effect, called coherent population trapping, one needs no microwave field to detect the frequency difference between magnetically shifted hyperfine sublevels of the atomic ground state. „Dark resonances“ are observed when the difference of two optical frequencies fits exactly the splitting frequency. This quantum interference effect appears on each atom, and two-frequency light is less absorbed in a cell when the frequency condition $\nu_1 - \nu_2 = \nu_{12}$ is fulfilled, and one observes „electromagnetically induced transparency“ (EIT). The Doppler effect of the atoms in the absorption cell is not relevant for this effect. Our group is investigating such quantum interference effects since 1990 (for an overview see ref. [2]).

The ground state sublevels involved may belong to the same hyperfine ground state. In this case, a single light frequency is enough to detect an EIT signal (Fig.3a). This signal appears if the frequency difference between the excited hyperfine sublevels is zero ($\nu_1 = \nu_2 = \nu_{01}$; $\nu_1 - \nu_2 = 0$), so if the external magnetic field is cancelled by a scannable field. The linewidth is a measure for not compensated external fields (Fig.4). The experimental arrangement is shown in Fig.5.

For using dark resonances between substates belonging to different hyperfine ground states (Fig. 3b) one has to produce coherent two-frequency light. The transmission signal through the absorption cell is detected in dependence on the difference of the two light frequencies. Sensitivities up to 1 pico-Tesla with one second integration time were demonstrated [3].

One of the advantages of the method is that a field sensor can be built completely without metallic parts. A possible sensor construction is shown in Fig.6.

Our work to develop all-optical magnetometers is funded by project no. G6RD-CT-2001-00642 of the European Commission.